

令和6年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目：共同 研究 研究期間：令和 4 年 10 月 ~ 令和 6 年 9 月

研究課題名：血流マルチスケール流動に対する乱流科学の新展開

ラボ長

所属：大学院基礎工学研究科 機能創成 専攻

職位 准教授 氏名：大谷智仁

研究成果：

(概要)

令和6年度において、主に下記の2つの内容に取り組んだ。1) 大血管中の血流場を想定したMRI流動計測の数値モデル開発を進め、乱流を含む複雑流動場のMRI信号情報の表現に成功した(Otani et al., *Magn Reson Med*, 2025)。さらにMRIの流動計測の理論を拡張し、流体の拡散効果が無視できない微細・低速流れの理論構築を達成した。また、2) 健常者と生体心移植患者の心血流MRI画像から、心移植患者に特有の血流動態を体系的に整理した(Otani et al., *Med Eng Phys*, in revision)。さらに、心血流MRI画像を血流速度場の時系列データとみなし、乱流分野における流動場の主成分評価にも用いられるDynamic mode decomposition (DMD)の導入を試みた。

(本文)

1) MRIを用いた複雑流動計測の実現可能性の検討

令和5年度において着手したMRI流動計測の数値シミュレーションの構築を進め、複雑流動場に対する計算手法の拡張および、MRIを用いた乱流計測の実現可能性について検討した。本シミュレーションでは、流動場における巨視的磁化の運動方程式(Bloch方程式)を数値的に解くとともに、実際のMRIに用いられる磁場制御アルゴリズムを導入し、得られた信号情報から、計測領域中の流速分布を画像として再構成する。成果として、磁化の励起時刻と核磁気共鳴信号の計測時刻とのずれに起因するバイアスの生成メカニズムを解明するとともに(図1左)、画素中の速度分布の分散に起因する見かけのMRI信号減衰の表現に成功した(図1右)。これらの知見から、提案するMRIの数値シミュレーションは、従来MRIにおける平均流速の計測技術の再現に留まらず、複雑な流動場に対するMRIの汎用的な観測モデルとして適用できる可能性がある。

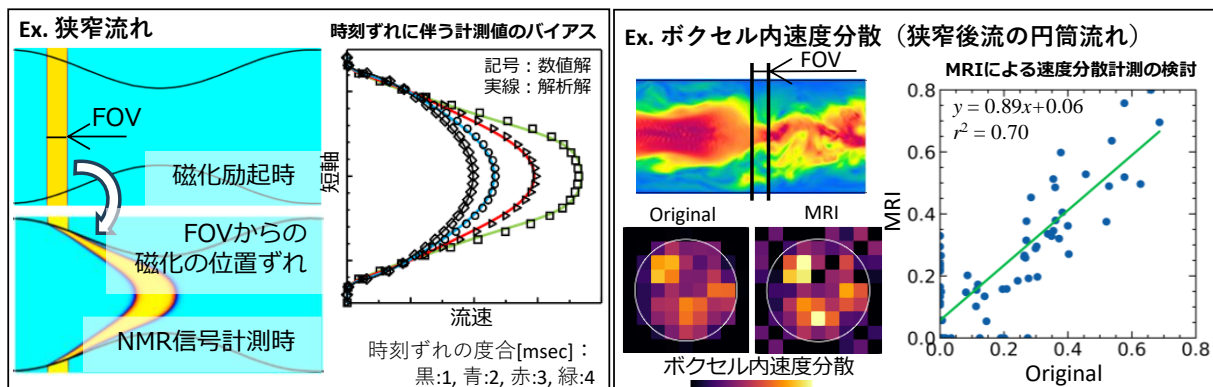


図1 MRI流動計測におけるバイアス発生メカニズム(左)と乱流計測への応用(右) (Otani et al., *Magn Reson Med*, 2025)。

これまでの検討で得た MRI 原理の知見と流体力学の理論体系の統一を試み、具体的な検討として、流体の分子拡散効果が無視できない、微細かつ低速流れの流動計測理論の構築を試みた。分子拡散効果を考慮した巨視的磁化の支配方程式に基づき、MRI 画素内の信号減衰の理論解を導出した。微細な流動場に起因する MRI の信号減衰は経験的に知られており、脳梗塞診断など複数の臨床応用が展開されてきたが、過去数十年において信号減衰の物理的意義が不明確なままにおかれていた。本成果により、MRI の出力情報が流動場の定量的性質を持つことを数理的に説明でき、医療計測技術に留まらない流体計測の基盤技術として、MRI の高いポテンシャルを見出せた (Otani et al., to be submitted.)。

2) 心血流 MRI 画像に基づく移植心の機能評価

昨年度までに構築した心血流 MRI 画像処理アルゴリズムを用いて、予後が良好な生体移植心患者に対して、健常者と比較した心機能評価をより発展させた (大阪大学医学部循環器内科との共同研究)。心機能の評価指標として、粒子追跡に基づく心拍に伴う左心室血流の交換率 (Eriksson et al., *JCMR*, 2011) など、従来提案されてきた指標を複数導入し、移植心患者と健常者との相違点を網羅的に調べた。結果として、心拍に伴う左心室の大きさや体積変化率、1心拍における血液の交換量、血流の運動エネルギーの最大値など、ほぼ全ての指標において移植心患者と健常者間に有意な差が無く、予後が良好な症例において、移植心の心機能が健常者と同程度の水準を満たすことを力学的観点からも説明できた。一方で、令和 5 年度において発見した、左心室の拡張末期における移植心特有の運動パターンはほぼ全ての症例で確認され (11 症例中 10 例)、移植心について、健常者と同程度の心機能を維持しつつも、機能維持のための運動パターンが異なることを発見した (Otani et al., *Med Eng Phys*, in revision)。

さらに、心血流 MRI 画像を、流速分布の時系列データとみなすことで、乱流力学分野において近年開発が進められている Dynamic mode decomposition (DMD) の導入を試みた。DMD は、時系列データの主成分分析に基づき、低次モードにおける流動場の時空間情報を抽出する技術であり、多くのノイズを含む心 MRI の血流情報から、主たる流動特性の抽出を試みた。現時点で、左心室への血流の流入出について、主流成分の抽出に成功しており (図 3)、慢性心不全患者など、心機能低下に対する定量的診断指標への適用可能性が期待できる。

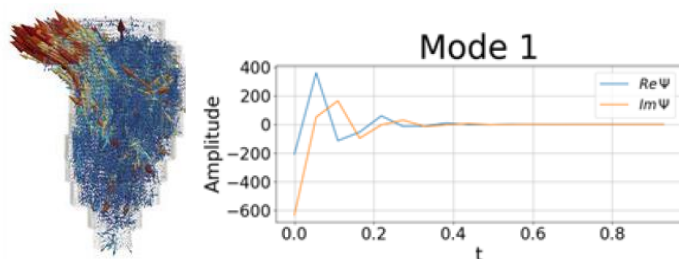


図 3 心血流 MRI 画像に対する DMD の適用 (1 次モード)。

研究経費 (R6 年度) の内訳 :

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0 円	107,080 円	77,920 円	0 円	15,000 円	200,000 円

共同研究者等：

(1) 共同研究者（氏名・所属）

本木慎吾・大学院基礎工学研究科機能創成専攻・非線形力学領域

(2) 研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

井手盛子・大阪大学医学部附属病院循環器内科・助教

関根鉄朗・日本医科大学放射線科・准教授

山下航生・大阪大学基礎工学部システム科学コース・学部4年生

発表論文等（令和7年3月31日現在）：

〔雑誌論文〕

- ・ T. Otani, T. Sekine, Y. Sato, E.C. Alves, S. Wada, An Eulerian formulation for the computational modeling of phase-contrast MRI, *Magnetic Resonance in Medicine*, 2025

〔著書〕 該当なし

〔学会発表〕 **招待講演のみ記載**

- ・ 大谷智仁, 脳循環を対象とする計算力学の近年の展開, 第40回日本脳神経血管内治療学会学術集会, 2024年11月
- ・ 大谷智仁, 脳脊髄液流れ解析の高度化にむけたMRIと計算力学の統合, 第16回日本水頭症脳脊髄液学会 2024年11月
- ・ 大谷智仁, 医工学分野における流体データ同化の課題, 2024年度九州大学IMI一般研究・研究集会、自動車性能の飛躍的向上を目指すData-Driven設計, 2024年10月
- ・ T. Otani, S. Wada, Computational modeling on mechanical properties of biphasic materials and medical imaging, IWACOM-IV, 福岡、2024年9月
- ・ T. Otani, K. Ueda, S. Maeda, S. Yamada, Y. Watanabe, S. Wada, Personalized computational modeling on ventricular cerebrospinal fluid flow dynamics, Hydrocephalus 2024, 愛知, 2024年9月
- ・ 大谷智仁, 和田成生、血流場の数値計算における血栓形成のリスク推定・関連疾患のモデル化、日本機械学会第36回バイオエンジニアリング講演会、愛知、2024年5月
- ・ T. Otani, On subject-specific computational modeling of physiological flow field using clinical images: current open issues, 2024 Korea-Japan joint symposium in KSME Bioengineering division annual meeting, 2024年4月

〔その他〕 該当なし

外部資金獲得状況・申請状況：該当なし

参考となるHP等：該当なし